

Add2Reliablade

Erweiterte Materialdaten und Computertomographie, virtuelle Prüfstände, Big Data und datenbasierte Modellierung als Ergänzung für Reliablade

Abschlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger:

Wölfel Engineering GmbH + Co. KG
Max-Planck-Straße 15
97204 Höchberg

Teilvorhaben: Virtuelle Prüfstände auf Basis bruchmechanischer
Ansätze

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2021 bis 30.04.2025

Autoren: Thomas Rief, Patrick Erdmann, Andreas Nuber

Höchberg 2025

Projektpartner:

Leibniz Universität Hannover, Institut für Windenergiesysteme (Hannover, Koordinator)
Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik (Hannover)
TECOSIM Technische Simulation GmbH (Wiesbaden)
TPI Composites Germany GmbH (Berlin)
Fraunhofer IWES Institut für Windenergiesysteme (Bremerhaven)
Wölfel Engineering GmbH + Co. KG (Höchberg)

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 0324335E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung zu.....	4
1. Aufgabenstellung.....	4
1.1 Hintergrund und Motivation	4
1.2 Zielsetzung.....	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
2.1 Technische Voraussetzungen	5
2.2 Organisatorische Voraussetzungen.....	6
2.3 Wirtschaftliche Voraussetzungen	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	7
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	7
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II. Eingehende Darstellung zu.....	8
1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	8
1.1 Teil-AP 2.6: Entwicklung und Validierung von Methoden und Modellen zur Schadensanalyse von Komponenten- und Ganzblattprüfungen	8
1.2 Teil-AP 3.4: Datenanalyse.....	19
1.3 Zusammenfassung und Zielabgleich für das Teilvorhaben von Wölfel.....	22
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	24
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	25
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	25
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	25
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	25

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

1.1 Hintergrund und Motivation

Rotorblätter sind eine der Kernkomponenten von Windenergieanlagen (WEA) und spielen durch die Überführung der Energie des Windes in eine Rotation eine entscheidende Rolle für den Energieertrag. Rotorblätter korrelieren somit direkt mit der Wirtschaftlichkeit der Anlage. Allerdings unterliegen Rotorblätter oftmals Imperfektionen, da sie weitestgehend manuell gefertigt werden und sind somit im Rahmen ihrer Fertigungstoleranzen Unikate. Die Rotorblätter unterliegen jedoch starken dynamischen Beanspruchungen sowie extremen Wetterbedingungen, was an den fertigungsbedingten Imperfektionen wie beispielsweise Ondulationen zu lokalen Lastspitzen führt. Diese induzieren wiederum erhöhte Ermüdungsschäden vor Ort.

Dieser Sachverhalt ist der grundlegende Ansatzpunkt des vorliegenden Forschungsvorhaben. In Begleitung zum Forschungsprojekt Reliablade sollen genaue Beobachtungen der Ermüdungsschadensentwicklung an Coupon- sowie Strukturversuchen durchgeführt werden. Diese sollen zur Validierung neuer oder erweiterter Modelle verwendet werden mit dem Fernziel die Prognose des wahrscheinlichen Schadensfortschritts und eine Aussage zur verbleibenden Lebensdauer zu ermöglichen. Eine numerische Beschreibung der Ermüdungsschadensentwicklung in Form virtueller Prüfstände für Subkomponenten und Rotorblätter ist die Grundlage für den Einsatz in modellbasierten Structural Health Monitoring (SHM) Systemen.

1.2 Zielsetzung

Das Gesamtziel des Verbundprojekts Add2Reliablade ist die strukturelle Zuverlässigkeit von Rotorblättern zu verbessern. Dieses Ziel soll im Wesentlichen durch die Verbesserung und Validierung bestehender Berechnungs- und Simulationsmodelle erreicht werden. Insgesamt werden die folgenden mittel- bis langfristigen übergeordneten Ziele verfolgt:

1. Signifikante Kostensenkung von Windenergieanlagen durch die Steigerung ihres Zuverlässigkeitsniveaus
2. Vorantreiben der Digitalisierung der Energiewende durch erweiterte Simulationsmodelle, virtuelle Prüfstände, zuverlässige digitale Zwillinge sowie digital aufgearbeitete Versuchsdaten auf der Material- und Strukturebene
3. OpenAccess-Veröffentlichungen vielfältiger Forschungsergebnisse
4. Integration der Forschungsergebnisse in Zustandsüberwachungs-Systeme (SHM).

In der Folge werden die für Wölfel spezifischen Zielstellungen beschrieben.

1.3 Aufgabenstellung von Wölfel

Die Wölfel Engineering GmbH & Co. KG übernahm innerhalb des Add2Reliablade-Verbundprojekts wesentliche Aufgaben im Rahmen des Teilvorhabens mit den aufgeführten eigenen wissenschaftliche und technische Arbeitszielen:

- Entwicklung und Validierung von Methoden und Modellen zur Schadensanalyse von Komponenten- und Ganzblattprüfungen
- Numerische Beschreibung von Schadensfortschritt durch Kombination bruchmechanischer Ansätze mit Signalanalyse und Mustererkennung
- Verfahren zur Bewertung der (Rest-)Tragfähigkeit eines Rotorblatts bei vorhandenen definierten Schäden in Abhängigkeit des Schadensortes
- Identifizieren, Aufbereiten, Auswerten und Verwenden von Mess-Datensätzen für Validierungszwecke und Model-Update

Insgesamt umfasst das Teilvorhaben von Wölfel somit die wesentlichen Elemente der Schadensinitiierung, des Schadenfortschritts sowie dessen numerischer Beschreibung und der Bewertung der Tragfähigkeit eines Rotorblatts. Analog erfolgt die Aufbereitung und Auswertung von Mess-Datensätzen zur Validierung und möglichen Model-Updates.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben wurde unter anspruchsvollen technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Diese Rahmenbedingungen prägten sowohl die konzeptionelle Ausrichtung als auch die operative Umsetzung des Projekts. Die enge inhaltliche Verzahnung mit dem EU-Projekt *ReliaBlade* erforderte eine präzise Abstimmung zwischen verschiedenen nationalen und internationalen Partnern sowie die Integration neuer wissenschaftlicher und industrieller Methoden in bestehende Simulations- und Prüfkonzepte.

Darüber hinaus hatte zu Beginn des Forschungsprojekts die Corona-Pandemie noch teilweise Auswirkungen auf die Durchführung des Vorhabens.

2.1 Technische Voraussetzungen

Das Projekt war durch eine hohe technologische Komplexität gekennzeichnet, bedingt durch die Notwendigkeit, eine durchgängige Simulations- und Analyseumgebung, welche die Einflüsse fertigungsbedingter Imperfektionen auf das Struktur- und Ermüdungsverhalten von Rotorblättern abbilden kann zu entwickeln.

Die technischen Voraussetzungen umfassen insbesondere in Bezug des Teilvorhabens von Wölfel:

- eine Schnittstelle zur Charakterisierung der Komponenten auf Grundlage von CT-Scans,
- die Integration von Materialmodellen inklusive Versagensmechanismen in makroskopische FEM- und MKS-Simulationen,
- sowie die Entwicklung bruchmechanischer und datenbasierter Schadensmodelle sowie virtueller Prüfstände zur Nachbildung von Ermüdungs- und Versagensmechanismen.

Die Umsetzung hierfür erfordert sowohl die Nutzung bestehender Forschungsergebnisse aus *ReliaBlade* als auch die Entwicklung neuartiger Modellierungsansätze. Die hierfür notwendige technische Forschungsinfrastruktur muss dementsprechend durch die Kombination von experimentellen Daten, numerischer Simulation und datengetriebener Modellierung geschaffen werden.

2.2 Organisatorische Voraussetzungen

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt mit insgesamt sechs Partnern realisiert, die komplementäre Kompetenzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Rotorblattentwicklung einbringen:

- *ForWind – Zentrum für Windenergieforschung Leibniz Universität Hannover (LUH)*: Entwicklung und Validierung von Materialmodellen, Durchführung von Versuchen zur Charakterisierung kurzfaserverstärkter Klebstoffe sowie Koordination des Forschungsprojekts
- *Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES)*: Durchführung und Auswertung von Material-, Komponentenversuchen; Aufbau und Betrieb der erforderlichen Prüfstände; Bereitstellung experimenteller Daten zur Validierung numerischer Modelle und zur Entwicklung virtueller Prüfstände.
- *Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) – Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT)*: Durchführung großformatiger Computertomographien (CT) an Rotorblattkomponenten; Entwicklung und Anwendung zerstörungsfreier Prüf- und Bildgebungsverfahren; Analyse und Aufbereitung der CT-Daten zur Detektion und Quantifizierung von Defekten sowie zur Modellvalidierung.
- *TECOSIM Technische Simulation GmbH*: Entwicklung automatisierter FE-Modell-Updates auf Basis von Scandaten und Anwendung von KI-Methoden zur Schadensklassifikation.
- *TPI Composites Germany GmbH*: Bereitstellung industrieller Expertise in der Rotorblattentwicklung und Validierung analytischer Modelle anhand von Produktionsdaten.
- *Wölfel Engineering GmbH + Co. KG*: Entwicklung und Validierung von Methoden und Modellen zur Schadensanalyse auf Basis bruchmechanischer Ansätze sowie numerische Bewertung der Resttragfähigkeit von Komponenten und Gesamtstrukturen.

Die organisatorische Zusammenarbeit erfolgte über regelmäßige Konsortialtreffen, Jour-Fixe-Runden sowie projektübergreifende Abstimmungen mit *ReliaBlade*. Aufgrund der engen Verzahnung der Arbeitspakete mussten entsprechende Schnittstellen regelmäßig abgestimmt werden, insbesondere für Datenaustausch, Versuchsspezifikationen und Simulationsmodelle. Die Projektkoordination durch die LUH gewährleistete einen konsistenten fachlichen und administrativen Rahmen.

2.3 Wirtschaftliche Voraussetzungen

Als forschungsintensives mittelständisches Unternehmen war Wölfel auf eine öffentliche Förderung angewiesen, um die im Projekt erforderlichen personellen, softwaretechnischen und infrastrukturellen Ressourcen bereitzustellen. Die Entwicklung und Validierung der bruchmechanischen Simulationsmodelle, die Durchführung umfangreicher Parameterstudien sowie die Implementierung von Modell-Update-Verfahren wären ohne Förderung wirtschaftlich nicht realisierbar gewesen.

Das Projekt war mit einem hohen wirtschaftlichen und technologischen Risiko verbunden, insbesondere hinsichtlich:

- der Prognosefähigkeit neu entwickelter Ermüdungs- und Schadensmodelle,
- des hohen Rechen- und Validierungsaufwands bei Multiskalen-Simulationen,
- der Abhängigkeit von experimentellen Eingangsdaten aus dem Partnerprojekt Reliablade

Zusätzlich bestand zum Projektstart keine Verfügbarkeit vergleichbarer Tools oder Simulationsansätze im Stand der Technik. Die Projektförderung ermöglichte die Bearbeitung dieser Themen mit der erforderlichen wissenschaftlichen Tiefe und Qualität.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war für die Dauer von 36 Monaten angelegt und wurde auf Antrag um 12 weitere Monate kostenneutral verlängert, um Verzögerungen im Verbundprojekt zu kompensieren. Neben turnusmäßigen Projekttreffen fand ein regelmäßiger JourFixe im 4-wöchigen Rhythmus statt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt. Lediglich Simulationsmethoden, die in der Literatur beschrieben sind, wurden auf die vorhandene Problemstellung angewendet bzw. weiterentwickelt.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Wesentlichen wurde die Fachliteratur über Internetrecherche bezogen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit beschränkte sich auf die oben genannten Verbundpartner sowie die Projektpartner des EU-Projekts Reliablade.

II. Eingehende Darstellung zu

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 Teil-AP 2.6: Entwicklung und Validierung von Methoden und Modellen zur Schadensanalyse von Komponenten- und Ganzblattprüfungen

1.1.1 Arbeitsaufgabe und Zielstellung des Teil-AP 2.6

In diesem Arbeitspaket sollten verschiedene Simulationsmodelle erstellt und validiert werden. Hierzu zählen parametrisierte FEM-Modelle zur Abbildung von Faserverbundstrukturen mit initialen Schäden sowie MKS-Modelle zur Bestimmung der Lasteinwirkung und als virtueller Prüfstand.

Basierend auf den Charakterisierungsversuchen sollten Analysemodelle erarbeitet werden, um abhängig von Schadensart und -ausprägung den Schadensfortschritt beschreiben zu können. Schlussendlich sollten Verfahren zu Bewertung der Resttragfähigkeit abgeleitet und validiert werden.

Die Zielstellungen umfassten dabei die

- Entwicklung von Modellen zur Analyse von initial geschädigten Faserverbundkunststoffen,
- Validierung der Modelle mit Daten aus Charakterisierungsversuchen und Referenzmessungen (CT-Messungen),
- Ableitung eines virtuellen Prüfstandes zur virtuellen Bauteilprüfung sowie
- ein Modell-Update.

Hierbei sollten verschiedene Modellansätze umgesetzt werden wie beispielsweise einem parametrisierten FEM-Modell zur Beschreibung von Ondulationen bzw. zur Simulation von Verklebungen. Auf Prüfstandesebene sollte sowohl ein MKS-Modell des Prüfaufbaus als auch ein partielles MKS-Modell einer WEA zur Lastableitung erstellt werden. Darüber hinaus galt es Analysemethoden zur Beschreibung des Schädigungsfortschritts abzuleiten und Parameterstudien durchzuführen. Weiterhin galt es eine Schnittstelle zur Einbindung der Modelle in großskalige Versuche umzusetzen sowie eine Methode zur Bewertung der Resttragfähigkeit und abschließend eine Methode zur Modell-Aktualisierung abzuleiten.

1.1.2 Erzielte Ergebnisse des Teil-AP 2.6

Task 2.6.1: Erstellen der MKS-Modelle

Die Arbeitsaufgabe bestand zunächst darin sowohl für eine WEA als auch die Prüfanordnung eines Rotorblatts entsprechende Simulationsmodelle aufzubauen. Hierbei sollte das WEA-Modell dazu dienen Lasten abzuleiten, die virtuell auf das Blatt aufgeprägt werden können, um realistische Belastungsszenarien in der Simulation prüfen zu können. Der Prüfstands Aufbau diente dazu die im Rahmen des Reliablade-Projekts durchgeführten Blattversuche abgleichen zu können.

Das partielle WEA Mehrkörper-Simulations-Modell (MKS) wurde anhand flexibler Körper erstellt und ist anhand seiner Baugruppen in Turm und Gondel, Antriebstrang und Blatt unterteilt. Das Modell ist generisch aufgebaut, um Adaptionen an verschiedene

Rahmenbedingungen zu ermöglichen. Komponenten, die den Frequenzbereich oder mögliche Bruchlastspitzen beeinflussen sind im Wesentlichen der Turm sowie die Blätter. Wichtigster Bestandteil des partiellen MKS-Modells einer WEA sowie für eine Prüfanordnung zur virtuellen Bauteilprüfung ist das Blatt. Dieses wurde anhand des im Projekt verwendeten Rotorblatts des Fraunhofer IWES modelliert. Die Schnittstellen des Versuchsaufbaus sind hierbei die Lagerung des Blattes an der Blattwurzel, welche fest eingespannt ist, sowie die Lastscheren, über die die Belastung in das zu prüfende Rotorblatt eingebracht wird. Die Einspannung an der Blattwurzel kann über eine Randbedingung an der Stirnfläche des Rotorblatts modelliert oder nach Bedarf auch über die Einspannvorrichtung mit Verbindung über die Verschraubung erfolgen. In Bezug auf die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse sind die zur Aufbringung der Last verwendeten Lastscheren sowie von genutzten Abstimmmassen elementar. Abbildung 1 zeigt den im Rahmen des Projekts verwendeten Versuchsaufbau, wobei die Lasteinleitung bei einer Länge von 15,5 Metern erfolgt, während die Abstimmmassen sich auf einer Länge bei 29 Metern befinden. Auf Höhe von 20 und 25 Metern sind im zu untersuchenden Rotorblatt Ondulationen im Gurt eingebracht.

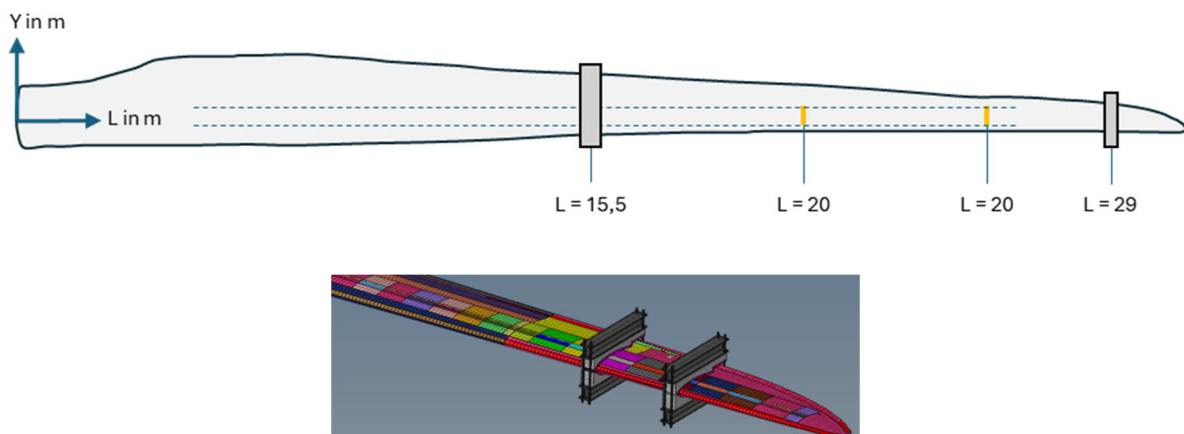


Abbildung 1 Schematische Zeichnung des IWES Rotorblatts mit einer Gesamtlänge von 31 m in der Draufsicht (oben) und Detail mit Abstimmmassen im MKS-Modell bei Länge 29 m (unten)

Ein Abgleich zwischen Modell und Versuch erfolgte durch Untersuchung der Eigenfrequenzen. Im Versuchsstand wurden diese durch einen Pull- und Releasetest sowie durch Hammerschlag angeregt. Die aus den Daten der Inertialmassensensoren vorliegenden Beschleunigungen dieser Versuche wurden ausgewertet und mit den Eigenfrequenzen der Moden des MKS-Modells verglichen. Hierbei ergaben sich Unterschiede, da die Beschleunigungssensoren im Bereich der Ondulationen angebracht sind. Die je nach Mode nicht optimalen Messpositionen sowie mögliche Massenunterschiede aus der Fertigung können Ursache für die Abweichungen sein. Abbildung 2 zeigt das Blatt in Anregung der ersten drei Moden.

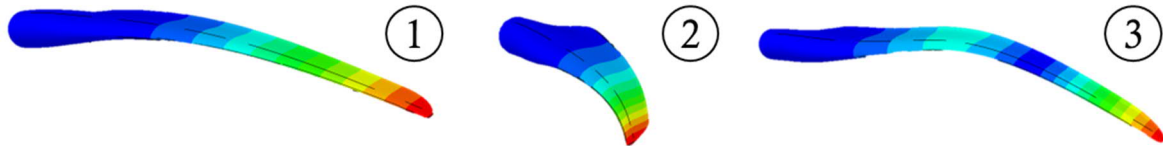


Abbildung 2 Blatt in Anregung der ersten drei Eigenmoden

Abhängigkeiten der simulierten wie der gemessenen Eigenfrequenzen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 1. Zusätzlich dazu sind die Ergebnisse einer angepassten Simulation durch Variation der Abstimm Massen dargestellt. Hierdurch stimmt zwar die erste Biegemode, die anderen Moden werden aber bei niedrigeren Frequenzen erreicht. Schlussendlich konnten die Abweichungen somit nur mit Fokus auf einzelne Eigenfrequenzen reduziert, allerdings nicht vollständig validiert werden.

Tabelle 1 Ermittelte Eigenmoden des Reliablade-Blatts durch Messung und Simulation

Eigenmode	Messung	Simulation	Simulation nach Anpassung
1. Mode (1st Flap)	1,0 Hz	1,28 Hz	1,06 Hz
2. Mode (1st Edge)	2,15 Hz	2,20 Hz	1,85 Hz
3. Mode (2nd Flap)	3,57 Hz	3,95 Hz	3,08 Hz

Das MKS-Modell der Gesamtanlage ermöglicht zusätzlich die Simulation des Rotorblatts unter Betriebslasten. Hierbei können die Schnittkräfte zwischen den Hauptkomponenten durch Berechnung der in Abaqus wirkenden Kopplungs-Kräfte und Momente am Blatt ermittelt werden. Diese können anschließend an das Blattmodell zur Schädigungsberechnung übertragen werden.

Task 2.6.2 Parametrisierte FEM-Modelle

Die parametrisierten FEM-Modelle dienen dazu Herstellungsfehler wie beispielsweise Ondulationen oder auch die Klebschichtdicke bei einer Verklebung zu variieren. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde sich beim parametrisierten FE-Modell zu Herstellungsfehlern auf Ondulationen fokussiert. Das erstellte Python-Skript ermöglicht die Erstellung eines parametrisiertes FEM-Submodells in allen Teilaspekten, wie den Dimensionen, der Anzahl der Knotenpunkte und der Vernetzung. Hiermit können Simulationsmodelle verschiedenster Ausprägungen der Ondulationen in Bezug auf geometrische Abmessungen (sowohl der Probe also auch der Ondulation selbst) oder des Lagenaufbaus automatisiert erstellt werden. Das interlaminare Versagen wird mittels Kohäsivzonen-Elementen abgebildet. Neben den Materialkennwerten, die das Versagen maßgeblich beeinflussen sind die weiteren Parameter zu Erstellung der Modelle der Ondulationswinkel, die Wellenlänge sowie die Höhe der Ondulation. Das Skript wurde zur Erstellung der Modelle zur Validierung der statischen Eigenschaften in AP.2.6.3 verwendet und ist in der folgenden Abbildung 3 dargestellt.

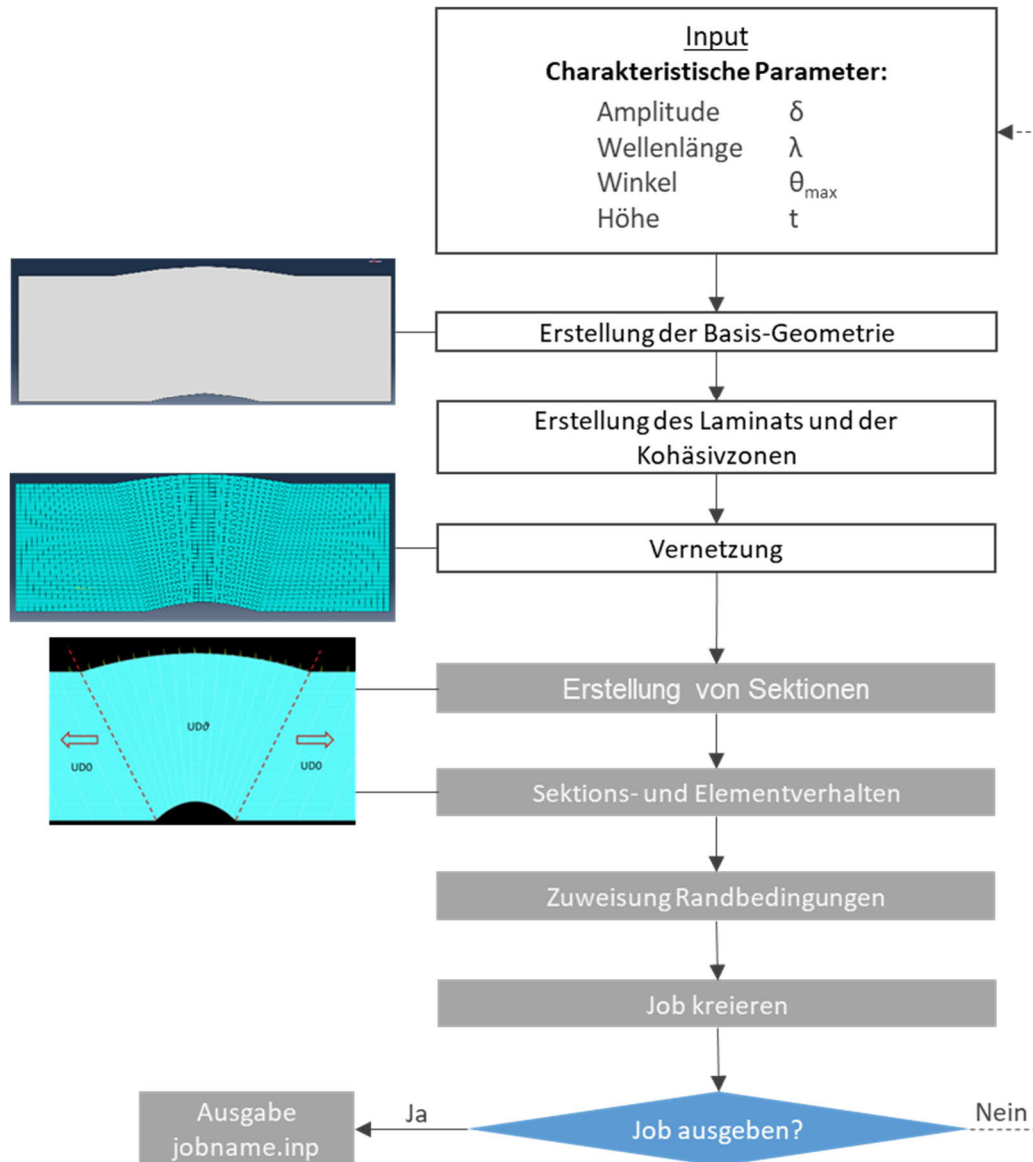
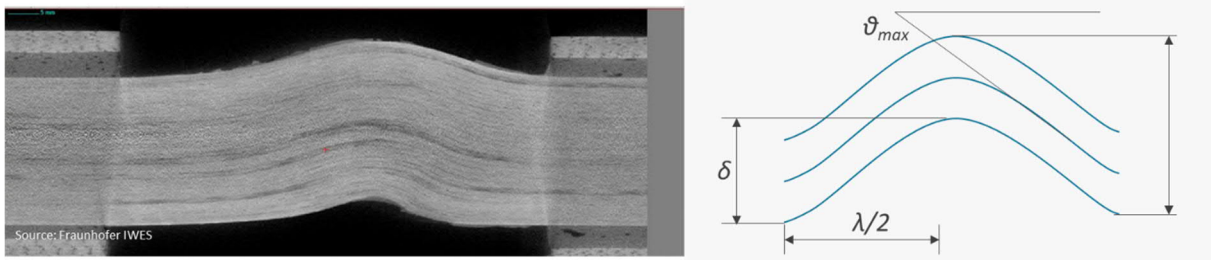


Abbildung 3 Flowchart-Skript zur Erstellung von Ondulationsmodellen auf Basis ihrer charakteristischen Parameter

Das Ondulationsmodell kann hierbei auch ein ebenes Laminat ohne Fehlstelle erzeugen. Da Delaminationen in der Ondulation einen wesentlichen Beitrag im Versagensverhalten darstellen, inkorporiert das Modell diese Schädigungsart schon durch Berücksichtigung mittels der Kohäsivzonenelemente zwischen den Laminatlagen. Charakteristische Kenngrößen zur Beschreibung einer Delamination sind in Abbildung 4 aufgeführt.



Mit: Amplitude δ , Wellenlänge λ , Ondulationswinkel ϑ_{max} und Gesamthöhe t

Abbildung 4 CT-Scan eines Ondulationsprüfkörpers (links, Bildquelle Fraunhofer IWES) und charakteristische Kenngrößen zur ihrer Beschreibung

Das Modell kann zur Berücksichtigung von Klebschichtschäden erweitert werden. Die Komplexität von Klebschichtschäden liegt aber weniger in der Modellerstellung als in der Variation der Klebstoffeigenschaften bzw. der Versagenskennwerte abhängig von der Klebschichtdicke.

Task 2.6.3 Analysemethode zur Beschreibung des Schädigungsfortschrittes

Zur Darstellung des Schädigungsfortschritts werden Modelle mit Kohäsivzonen bevorzugt betrachtet, da die Schädigung des Laminats hauptsächlich durch interlaminares Versagen stattfindet. Bei Verwendung von Kohäsivzonenelementen wird ein spannungsbasiertes Versagenskriterium unter Berücksichtigung der Energiefreisetzungsraten verwendet. Für eine Ondulation unter Zugspannung wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der festgestellt werden konnte, dass vor allem die Festigkeit in Schubrichtung des Interface die Versagensspannung der Ondulation bestimmt. Grafische Ergebnisse dazu sind Abbildung 5 gezeigt.

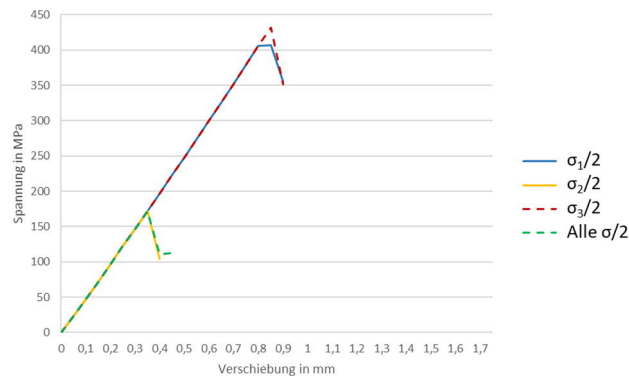


Abbildung 5 Spannungs-Weg-Diagramm von Ondulationen in Abhängigkeit von ihren Interface-Festigkeiten σ_1 , σ_2 , und σ_3 unter Zuglast

Die Sensitivitätsanalyse einer Ondulation wurde ebenfalls unter Druckspannung durchgeführt. Diese zeigt die gleichen Tendenzen, dargestellt in Abbildung 6.

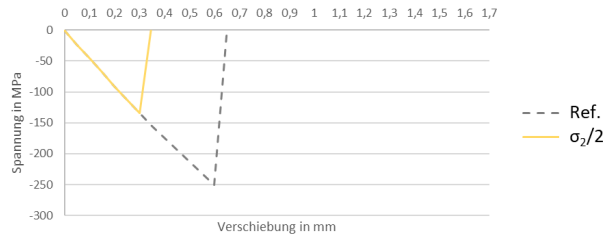


Abbildung 6 Spannungs-Weg-Diagramm von Ondulationen in Abhängigkeit von der Interface-Festigkeit σ_2 unter Drucklast

Weiterhin wurde das rein elastische Materialmodell für die Faserlagen durch ein linear-elastisches Materialmodell mit Schädigungsinitiierung abhängig vom Versagensmodus (Failure Subroutine) ersetzt. Hiermit wurden repräsentative Rechnungen mit verschiedenen Elementtypen in Abaqus wiederholt. Der Einfluss auf das Ergebnis in Bezug auf die Laminatfestigkeit ist allerdings gering, wie in Tabelle 2 dargestellt. Der Einfluss der Failure Subroutine auf den Schadensfortschritt nach Initiierung eines ersten Schadens wird größer eingeschätzt.

Tabelle 2 Einflüsse von Elementtyp und Modellierungsansatz auf berechnete Versagenskennwerte

Elementtyp & Modellansatz	Festigkeit	Verschiebung bei Versagen
C3D8R	167.97 MPa	0.31 mm
C3D8I	207.81 MPa	0.38 mm
C3D8R & Failure Subroutine	167.81 MPa	0.31 mm
C3D8I & Failure Subroutine	208.31 MPa	0.38 mm

Die entwickelten Methoden sind zum Abschätzen der Schädigungsinitiierung ausreichend und wurden für die nachfolgenden Parameterstudien verwendet.

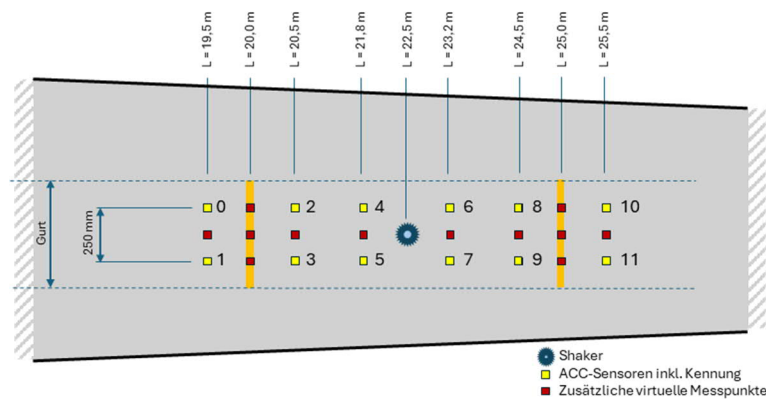


Abbildung 7 Messsetup am Ausschnitt des Rotorblatts mit aktiver Schwingungsanregung am Rotorblatt im Bereich der Welligkeiten (orange), realen Messstellen (gelb) und rein virtuellen Messstellen (dunkelrot)

Weiterhin wurde begleitend zur Ganzblattprüfung ein Shakertest mit externer Schwingungsanregung an der DTU durchgeführt, der das Potenzial zur Detektion einer Rissentstehung und Fortpflanzung durch eine veränderte Frequency Response Analyse darstellen soll. Hierbei wurde der Versuch entsprechend dem Setup aus Abbildung 7 virtuell simulativ abgebildet.

Task 2.6.4: Parameterstudien

Die Modelle der Ondulationen wurden mit dem Skript des parametrisierten Modells der Ondulation für unterschiedliche Winkel aufgebaut und statisch hinsichtlich ihrer Steifigkeit und Festigkeit analysiert. Die interlaminaren bruchmechanischen Kennwerte für das verwendete Harzmaterial wurden aus der Literatur entnommen. Zu den einzelnen verwendeten Winkeln liegen Versuchsergebnisse aus hergestellten Ondulationsprüfkörpern vor.

Für die Parameterstudie wurde die Konfiguration mit C3D8I-Elementen und dem Materialmodell mit Schädigung verwendet. Hiermit wurde ein Parameterbereich von null bis 15 Grad des Ondulationswinkels in ein-Grad-Schritten durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt sich bereits ab einem Ondulationswinkel von drei Grad ein signifikanter Einfluss auf die Kompressionsfestigkeit der Probe.

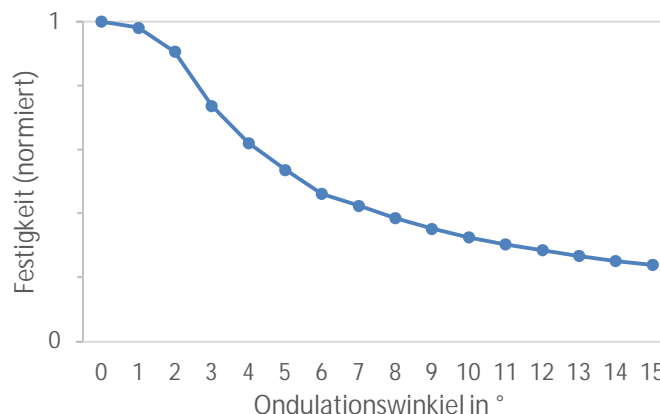


Abbildung 8 Festigkeit in Abhängigkeit des Ondulationswinkels

Am Gesamtblattversuch wurden an den Messstellen aus dem Versuch sowie den zusätzlichen virtuellen Messstellen die Beschleunigungen, abhängig von verschiedenen globalen Dämpfungen untersucht. Die Vermutung ist, dass sich ein Schadensfortschritt durch eine Reduzierung der Amplitude aufgrund von Reibungseffekten an der Schadensstelle auswirkt. Ein direkter Einfluss ist in Abbildung 9 anhand der abnehmenden Frequenzspektren erkennbar.

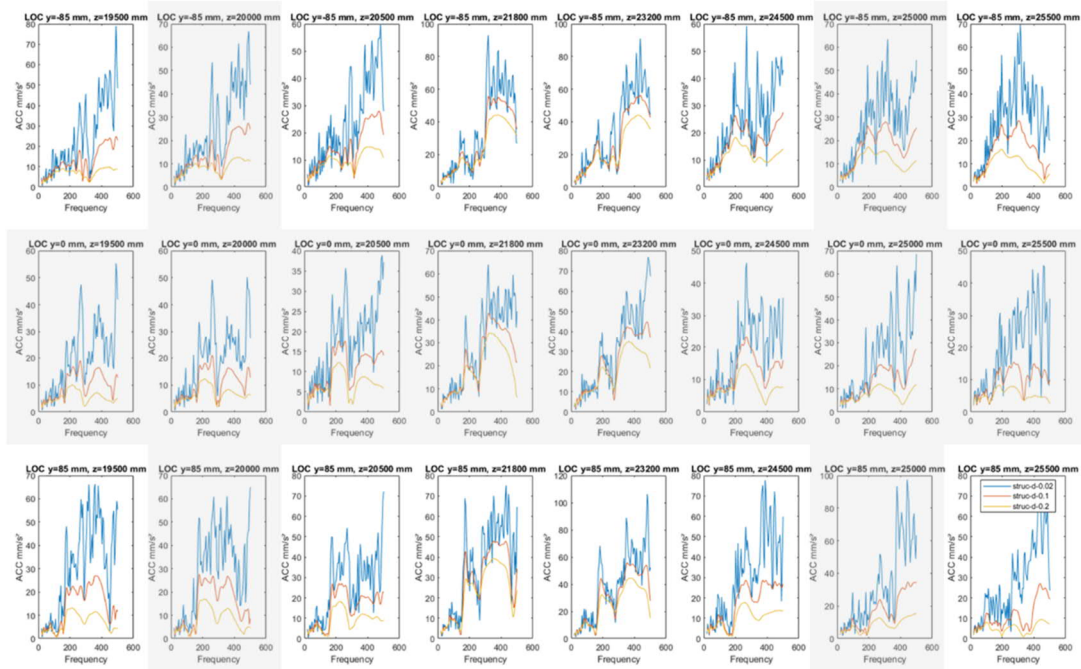


Abbildung 9 Messfrequenzen des Blattmodells an Messstellen des Prüfsetups bei einer externen Frequenzanregung bei unterschiedlichen Dämpfungen, rein virtuelle Messstellen sind grau hinterlegt

Task 2.6.5: Einbetten der Sub-Schadensmodelle in die Komponenten- und Ganzblattversuche

Auf Grundlage der Arbeiten aus AP2.6.3 sowie AP2.6.4 konnte eine Einbettung auf verschiedenen Skalen umgesetzt werden. Im Fall des Übertrags auf Ganzblattversuche ergibt sich über den dargestellten Einfluss der Dämpfung die Möglichkeit basierend auf der Schädigungsgröße die Dämpfungsparameter lokal anzupassen. In dem Fall entspricht das Einbetten der Kopplung eines Degradationsverlaufs abhängig vom Schädigungsmodell. Die Korrelation zwischen Dämpfung und Schaden beruht allerdings auf der Theorie, dass durch die Delamination im Laminat Kontaktflächen mit Reibung entstehen. Die hierfür notwendigen Parameter mussten allerdings empirisch ermittelt werden, da Reibkennwerte delaminierter Schichten des Laminats nicht vorlagen.

Neben einer Einbettung durch Anpassung lokaler Parameter auf Grundlage von Schädigungsverhalten können Modelle auch direkt miteinander verknüpft werden. Untersuchungen zur Einbettung von Sub-Schadensmodellen über getrennte Schichten von Schalenelementen, verbunden über Kohäsivzonenelemente, wurden durchgeführt. Mit diesem Ansatz können Delaminationsebenen vereinfacht berücksichtigt werden. Die im Detailmodell festgestellten Delaminationsbereiche sollen durch getrennte Schalen in das Gesamtblattmodell übertragen werden.

Task 2.6.6: Verfahren zur Bewertung der Resttragfähigkeit (Komponenten/Ganzblatt)

Für die Bewertung der Resttragfähigkeit gibt es zwei Ansätze. Zum einen können simulationsbasierte Ansätze auf Grundlage der Komponenten umgesetzt werden. Dies wurde anhand des Ondulationsmodells verfolgt. Auf Basis des skriptbasierten Modellansatzes kann die Tragfähigkeit der Komponenten bewertet werden.

Zum anderen kann ein kausal getriebener Ansatz verfolgt werden, bei dem im Versuch beobachtete Änderungen an der Struktur und den Frequenzspektren mit der vorliegenden Schädigung korreliert werden. Anhand dieser Korrelation mit Schadensübertrag kann wiederum die Resttragfähigkeit bewertet werden. Beispielsweise ist es das Ziel anhand von am Rotorblatt durchgeführten aktiven Schwingungsmessungen mittels Shaker Rückschlüsse auf die Schädigungsprogression der Welligkeiten ziehen zu können. Hierfür wurden am Rotorblatt verschiedene Ermüdungsversuche (Hinterkantenbelastung und Schlagbelastung) durchgeführt. Mit einem Einfluss der Ermüdungsschädigung an der Welligkeit auf die Dämpfung wäre es somit möglich diese miteinander zu korrelieren und Rückschlüsse auf die Resttragfähigkeit zu ziehen.

Task 2.6.7: Validieren der Methoden und Modelle anhand von Versuchsdaten

Ergebnisse der durchgeführten Komponenten und Ganzblattversuche sowie den zugehörigen Simulationsergebnissen sind nachfolgend dargestellt.

Im Fall der Komponentenversuche an hergestellten Welligkeitsprüfkörpern konnte der Trend der Festigkeitsdegradierung mit größerem Winkel der Ondulation anhand der Versuche nachgewiesen werden. Dieser Trend entspricht auch dem im Rahmen der Parametervariation festgestellten Verhalten und ist in Abbildung 10 dargestellt. Allerdings ließ sich eine absolute Übereinstimmung aufgrund fehlender bruchmechanischer Materialkennwerte nicht umsetzen. Wie bei der Parametervariation zeigte sich, dass das Kohäsivmodell einen großen Einfluss auf die Versagensspannung der Ondulation vorweist. Im vorliegenden Fall wurden in einem ersten Ansatz generische Kennwerte angenommen, während bei einem zweiten Ansatz Kennwerte aus einer wissenschaftlichen Veröffentlichung zum vorliegenden Material eingesetzt wurden. Es zeigt sich, dass mit dem ersten Ansatz die Versagensspannung deutlich überschätzt wird. Der zweite Modellierungsansatz stellt sich als konservativ dar.

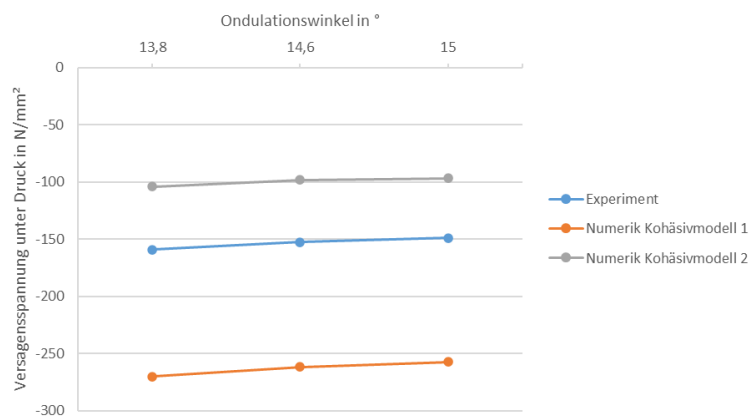


Abbildung 10 Festigkeit geprüfter Ondulationsprüfkörper (blau) gegenüber verschiedenen Kohäsivmodellen in der Simulation

Darüber hinaus lässt sich eine gute Übereinstimmung der Schädigungseffekte durch lokales Ausknicken zwischen physikalischem Versuch und Simulation, wie in Abbildung 11 gezeigt, feststellen. Hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens konnte auf Basis der vorliegenden Versuche keine Validierung erfolgen.

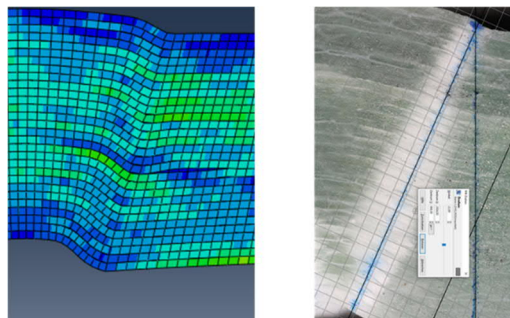


Abbildung 11 Lokales Ausknicken der Ondulation Simulation (links) gegenüber Versuch (rechts, Bildquelle Fraunhofer IWES)

Bei der Prüfstandsmodellierung und Modalanalyse konnte der prinzipielle Verlauf der Übertragungsfunktionen im Modell an insgesamt sieben der zwölf Messstellen mit guter bis sehr guter Übereinstimmung am ungeschädigten Blatt erzielt werden, wie in Abbildung 12 dargestellt.

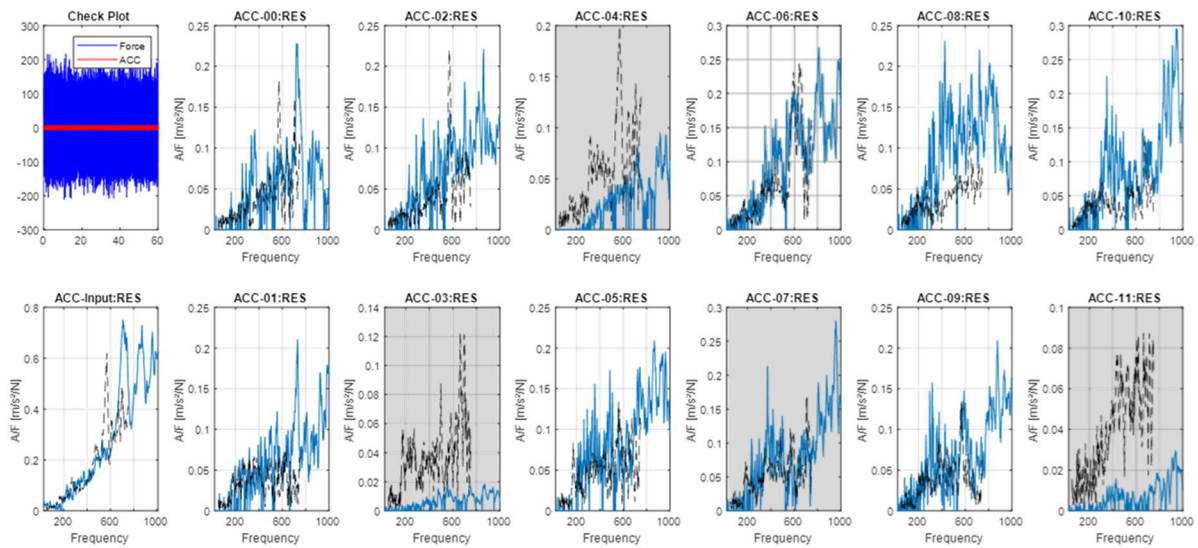


Abbildung 12 Validierung des Simulationsmodells anhand der Transferfunktionen aus dem Shakerversuch im ungeschädigten Zustand (blau) gegenüber der Simulation (schwarz gestrichelt), Fehlerhafte, bzw. inkohärente Messstellen sind grau unterlegt.

Im Detail ist folgendes zu erkennen:

- Der Checkplot (links oben) vergleicht die Anregungskräfte des Shakers mit den Beschleunigungen am Anregungspunkt und stellt somit eine erste Plausibilitätsprüfung dar
- Für die Transferfunktion im Anregungspunkt stellt sich grundsätzlich eine gute Übereinstimmung bis 500 Hz dar. Peaks der Transferfunktionen unterscheiden sich allerdings zwischen der Simulation mit 580 Hz sowie den Versuchsdaten bei 700 Hz und darüber. Ein valider Vergleich ist somit bei Frequenzen unterhalb von 500 Hz möglich.
- An den Messpositionen 0 bis 2 sowie 5 bis 7 und 9 ist eine valide Übereinstimmung der Transferfunktionen erkennbar. Einzelne Abweichungen in Bereichen von 300 Hz an den Messpositionen 0, 2, 7 und 9 sowie zwischen 400 - 500 Hz im Fall von Messposition 6 sind erkennbar. Der Peak aus der Anregung bei 580 Hz der Simulation ist in wenigen virtuellen Messstellen ebenfalls vorzufinden.
- Dem gegenüber stehen im Fall von Messposition 8 und 10 nur eine Übereinstimmung bis 250 Hz, danach ergibt sich eine deutliche Unterschätzung der simulierten Frequenzantwort
- An den Messpositionen 3, 4 und 11 ergibt sich eine deutliche Überschätzung der gesamten Frequenzantwort. Dies kann aber auch ursächlich in einem kompromittierten Messsignal liegen. Der Hintergrund hierzu sowie die Datenaufbereitung ist in Task 3.4.2 erläutert. Kompromittierte Messstellen sind im Plot grau hinterlegt.

Zusammenfassend lässt sich somit eine Validierung nur zum Teil lokal und in einem Frequenzbereich bis 500 Hz im vorliegenden Fall darstellen. Im Rahmen der Komplexität der Simulation sowie des Messaufbaus und seiner Auswertung können Unterschiede in einzelnen

Frequenzbereichen zum Teil durch die in der Simulation idealisierten Laminataufbauten zurückzuführen sein. Auch sind Herstellungsabweichungen nach wie vor, trotz der ausführlichen Dokumentation und Prüfung nicht auszuschließen. Die Unterschätzung einzelner Peaks der Übertragungsfunktion kann auf die unterschiedlichen Eigenfrequenzen zwischen Simulation und Versuch zurückzuführen sein (vergleiche hierzu Tabelle 1).

1.2 Teil-AP 3.4: Datenanalyse

1.2.1 Arbeitsaufgabe und Zielstellung des Teil-AP 3.4

Der Schwerpunkt dieses Arbeitspakets lag auf der Auswertung der im flankierenden Projekt ReliaBlade sowie in AP 1 dieses Projekts erzeugten Versuchsdaten. Dies umfasste die vollständige Dokumentation und Analyse der durchgeführten Coupon-, Komponenten- und Ganzblattversuche einschließlich der zugehörigen Fertigungsabläufe, Entwurfsunterlagen und Prüfergebnisse. Im Mittelpunkt stand die strukturierte Sichtung, Aufbereitung und Bewertung der verschiedenen Datenquellen, um diese für weiterführende Analysen und Modellierungen nutzbar zu machen. Darüber hinaus sollte ein systematischer Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit den bestehenden numerischen Modellen erfolgen, um die Modellgüte zu prüfen und mögliche Verbesserungsansätze sowie einen Workflow für ein Model-Update abzuleiten.

Die Zielstellung des Teil-AP 3.4 beinhaltete die Sichtung, Identifikation, Aufbereitung und Analyse der verfügbaren Versuchsdatensätze sowie den Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit den bestehenden Modellierungen.

1.2.2 Erzielte Ergebnisse des Teil-AP 3.4

Tasks 3.4.1 Sichten und identifizieren relevanter Datensätze und 3.4.2 Aufbereiten und analysieren der identifizierten Datensätze

Hinsichtlich der Versuchsplanungen erfolgte ein regelmäßiger Austausch mit den Projektpartnern des Fraunhofer IWES für die Komponentenversuche sowie der DTU bei den Gesamtblattversuchen.

Die von den Partnern im Rahmen der Versuchsreihen ermittelten Datensätze aus Reliablade sowie Add2Reliablade wurden entsprechend den Anforderungen für die Simulation analysiert. Grundlage war ein regelmäßiger Austausch mit den durchführenden Stellen wie beispielsweise in Reliablade anhand von Regelabsprachen zur Versuchsdurchführung und dem zur Verfügung stellen der Messdaten über die Projektcloud.

Die relevanten Strukturversuche an Komponenten (Ondulationen) sowie dem Rotorblatt (Ermüdung und externe Frequenzanregung) wurden anschließend gesichtet und geprüft. Im Fall der Ermüdungsversuche des Rotorblatts konnten allerdings bis zuletzt offene Fragestellungen zur exakten Lasteinwirkung nicht abschließend geklärt werden. Ein Abgleich mit Simulationen ist in diesem Fall nicht zielführend, sodass sich auf Versuche mit externer Anregung zur Bewertung der Schädigungsprogression konzentriert wurde.

Task 3.4.2 Aufbereiten und analysieren der identifizierten Datensätze

Im Fall der Ondulationsprüfungen stellten die ermittelten Messdatensätze hinsichtlich Datenmengen und Auswertung keine größeren Anforderungen im Rahmen der quasistatischen Versuche dar. Hier mussten für die Spannungsauswertungen nur die Prüfkräfte mit der Querschnittsfläche der Prüfkörper korreliert werden.

Komplexer stellte es sich im Fall der Reliablade-Versuchsdaten mit dem Fokus auf der Strukturdynamik dar. Die Messdatenaufbereitung lässt sich am Beispiel der Versuche mit Frequenzanregung am besten darstellen. Hier sind die im Rahmen der insgesamt 59 Versuche mit aktiver Schwingungsanregung erhaltenen Messdaten vielfältiger. Bei ersten Auswertungen wurde festgestellt, dass einzelne Messpositionen fehlerhafte beziehungsweise nicht erklärbare Ergebnisse mit hohen Schwankungen liefern, wie in Abbildung 13 im Fall des Beschleunigungssignals gezeigt.

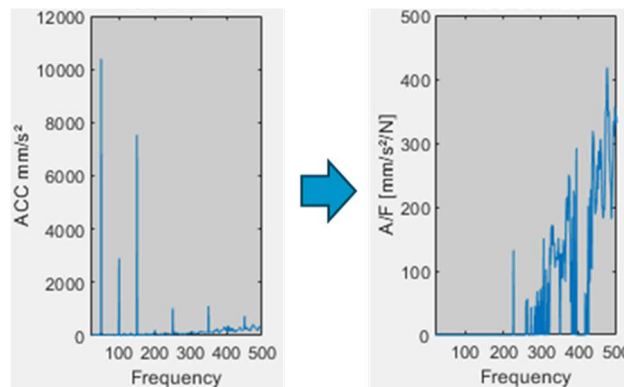


Abbildung 13 Beschleunigungssignal (links) zu gewichteter Transferfunktion (rechts)

Zur Sicherstellung der Datenqualität wurde die Kohärenz zwischen Anregungs- und Antwortsignal ausgewertet und Frequenzbereiche mit einer Kohärenz unter 0,9 als unzuverlässig markiert. Auf Basis dieser Bewertung wurde eine gewichtete Transferfunktion berechnet, bei der nur die kohärenten Anteile berücksichtigt wurden, um eine robuste und aussagekräftige Systemantwort zu erhalten. Da die Schwankungen in den Ergebnissen jedoch nicht in allen Messreihen eindeutig vorlagen, sind diese Messpositionen in den dargestellten Plots gesondert grau hinterlegt hervorgehoben. Mögliche Ursachen für reduzierte Kohärenz sind unzureichende Anregungsenergie, Störeinflüsse oder Rauschen im Messsystem sowie nichtlineare oder nicht angeregte Strukturdynamik in einzelnen Frequenzbereichen.

Die Bewertung der Kohärenz erfolgt automatisch im Zuge der Messdatenauswertung. Die gewichteten Transferfunktionen bilden die Grundlage für die Validierung des Modellansatzes (Task 2.6.7) sowie dem Abgleich mit Simulationsergebnissen (Task 3.4.3).

Task 3.4.3: Abgleich der Daten mit den Simulationsergebnissen:

Für den Fall der statischen Prüfungen an Ondulationsprüfkörpern ist der Abgleich im Rahmen der Arbeiten von Task 2.6.7 erfolgt und dargestellt. Vergleichender Parameter ist in diesem Fall die Prüfkörperfestigkeit.

Die extern angeregten Prüfungen mit ihren Transferfunktionen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen. So sind für jeden Tag eines Prüfblocks mehrere Messreihen vorhanden. Abbildung 14 stellt Messreihen zu verschiedenen Zeitpunkten der Ermüdungsversuche in Schlagrichtung des Rotorblatts dar. Der Versuch zeigt hierbei ein sehr schnelles Schädigungswachstum in Form von Delamination an den eingefügten Defekten in Form von Ondulationen des Gurtes.

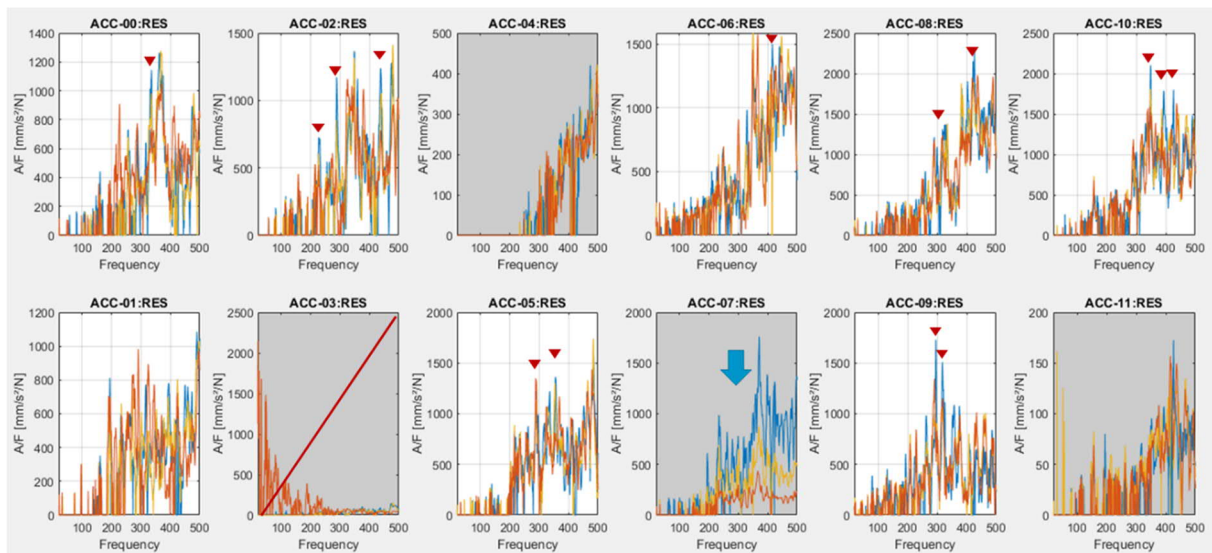


Abbildung 14 Gewichtete Transferfunktionen zu verschiedenen Schädigungszeitpunkten der Ondulation mit blau ungeschädigter Referenz, gelb erster Schädigung und orange fortgeschrittener Schädigung

Entgegen der Annahme im Rahmen der Parametervariation der Simulation zeigt sich in dem überwiegenden Teil der Versuchsdaten keine lokal höhere Dämpfung mit fortschreitender Schädigung (siehe Abbildung 14). Nur im Fall von Sensorposition ACC-07 ist ein Trend wie aus Abbildung 9 erkennbar, wobei hier weitere Einflüsse auf das Messsignal nicht auszuschließen sind. Weitere Messpositionen liefern keinen Mehrwert, da keine Differenzierungen erkennbar sind. Die im Versuch und in der Berechnung erstellte Ondulierung beeinflusst somit die globale Steifigkeit und das globale, dynamische Verhalten des Blattes deutlich weniger als angenommen. Ein Übertrag des Modellansatzes auf das Gesamtanlagenmodell mit Berücksichtigung des Blattes mit und ohne Schädigung liefert dementsprechend auch keinen weiteren Mehrwert basierend auf den Versuchsergebnissen. Die grundsätzliche Wechselwirkung von Schädigung mit Schwingungsphänomenen, wie sie an Sensorposition ACC-07 erkennbar ist, bleibt dennoch interessant und soll zukünftig seitens Wölfel weiter im Fall anderer Schädigungsereignisse untersucht werden.

1.3 Zusammenfassung und Zielabgleich für das Teilvorhaben von Wölfel

1.3.1 Ausgangslage und Zielstellung

Das Teilvorhaben „Virtuelle Prüfstände auf Basis bruchmechanischer Ansätze“ von Wölfel Engineering GmbH & Co. KG im Rahmen von Add2ReliaBlade zielte auf die Entwicklung innovativer Modelle zur Analyse von Faserverbundkunststoffen ab.

Wölfel verfügt über eine langjährige Expertise in der numerischen Simulation, insbesondere in der Finite-Elemente-Methode und der Mehrkörpersimulation, und ist seit vielen Jahren in der Windenergiebranche aktiv – unter anderem als europäischer Marktführer im Bereich strukturmechanischer Überwachungssysteme. Dennoch bestehen weiterhin Wissenslücken hinsichtlich der Auswirkungen fertigungsbedingter Imperfektionen sowie des komplexen Ermüdungs- und Bruchverhaltens von Faserverbundstrukturen in Rotorblättern. Das ursprüngliche Projekt ReliaBlade liefert hierfür umfangreiche Versuchs- und Referenzdaten, jedoch fehlten detaillierte Modelle zur robusten Schadensanalyse und -prognose. Diese Lücke bildet den Ausgangspunkt für das Teilvorhaben.

Ziel des Teilvorhabens war es, modellgestützte Verfahren zur Analyse, Bewertung und Vorhersage des Schädigungs- und Versagensverhaltens von Faserverbundstrukturen weiterzuentwickeln. Dazu sollten parametrisierte FEM- und MKS-Modelle erstellt, bruchmechanische Ansätze zur Simulation des Schadensfortschritts erarbeitet, und Methoden zur Bewertung der Resttragfähigkeit abgeleitet und validiert werden. Die Modelle sollten anhand der in ReliaBlade und Add2ReliaBlade generierten Coupon-, Komponenten- und Ganzblatttests abgestimmt und in virtuelle Prüfstände überführt werden.

1.3.2 Umsetzung und Ergebnisse im Einzelnen

Die Umsetzung und Ergebnisse sind ausführlich in den vorangegangenen Kapiteln 1.1 sowie 1.2 beschrieben. In Kürze sind dies:

a) Umsetzung von MKS-Modellen zur virtuellen Bauteilprüfung

Die MKS-Modelle für die WEA und den Prüfstand wurden erfolgreich aufgebaut und ermöglichen die Ableitung von Lasten sowie den Abgleich mit den experimentellen Prüfstandsdaten. Die Modelle bilden die relevanten Eigenfrequenzen und Schnittgrößen hinreichend genau ab und schaffen damit eine tragfähige Grundlage für virtuelle Bauteilprüfungen.

b) Parametrisierte FEM-Schädigungsmodelle

Parametrisierte FEM-Schädigungsmodelle zur Beschreibung von Ondulationen wurden vollständig skriptbasiert umgesetzt und ermöglichen eine effiziente Generierung unterschiedlicher Fehlstellenausprägungen. Die Modelle bilden charakteristische Versagensmechanismen einschließlich interlaminarer Delaminationen ab.

c) Beschreibung des Schädigungsfortschritts

Für den Schädigungsfortschritt wurden kohäsivbasierte Methoden und ergänzende Versagenskriterien implementiert und in Sensitivitätsanalysen erprobt. Die Ansätze

erlauben eine konsistente Ableitung der Schadensinitiierung und zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung mit beobachteten Versagensbildern.

d) Parameterstudien

Die Parameterstudien zu Ondulationen wurden erfolgreich mittels des parametrisierten FE-Modells durchgeführt und liefern einen klaren Trend einer abnehmenden Festigkeit bereits ab geringen Ondulationswinkeln. Die Ergebnisse stimmen qualitativ mit den experimentellen Prüfkörperdaten überein und bestätigen die hohe Sensitivität des Laminats gegenüber geometrischen Abweichungen. Untersuchungen in den Simulationen zum dynamischen Verhalten am Gesamtblatt zeigen einen deutlichen Einfluss angenommener dämpfungsinduzierter Effekte durch Schädigungsfortschritt. Diese erwarteten dämpfungsinduzierten Effekte waren in den vorliegenden Versuchen kaum ausgeprägt, sodass sich kein übertragbares Muster ableiten ließ.

e) Bewertung der Resttragfähigkeit

Für die Resttragfähigkeitsbewertung standen sowohl simulationsbasierte Ansätze als auch experimentell abgeleitete Indikatoren zur Verfügung. Während die statische Abschätzung der Tragfähigkeit über die Ondulationsmodelle robuste Aussagen zur Schädigungsinitiierung zuließ, konnte das dynamische Verfahren auf Basis veränderter Dämpfung oder Frequenzantworten mangels klarer Korrelation in den Messdaten nicht validiert werden. Insgesamt stehen damit verlässliche Komponentenbewertungen bereit, während eine übertragbare Bewertung auf Ganzblattebene nur eingeschränkt möglich war.

f) Analytierte Datensätze aus ReliaBlade sowie Add2ReliaBlade-Versuchen

Mit den bei den Prüfungen führenden Projektpartnern fand ein regelmäßiger Austausch statt. Alle relevanten Versuchsdatensätze aus ReliaBlade und Add2ReliaBlade wurden gesichtet, bereinigt und hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft. Für die Ondulationsprüfkörper konnten vollständige statische Kennwerte abgeleitet werden, während die umfangreichen dynamischen Messreihen aus den Ganzblattversuchen einer detaillierten Kohärenz- und Qualitätsanalyse unterzogen wurden. Trotz teilweise kompromittierter Messpositionen standen konsolidierte, auswertbare Datensätze zur Verfügung, die eine gezielte Modellvalidierung und Ergebnisinterpretation ermöglichen.

g) Model-Update

Für das Model-Update wurde ein physikalisch motivierter Ansatz zur Schadensindikation entwickelt und durch numerische Modelle untermauert. Die Methoden wurden in einen durchgängigen Workflow integriert, jedoch zeigte der Abgleich mit den Messdaten keine belastbare Korrelation. Dies bedeutet nicht, dass der Ansatz ungeeignet ist – vielmehr erwies sich die verfügbare Datenbasis als zu grob, um die Modelle zuverlässig evaluieren zu können. Der entwickelte Workflow bildet dennoch eine Grundlage für zukünftige Erweiterungen und automatisierte Modellanpassungen.

1.3.3 Zielabgleich und Nutzen für Wölfel

Folgende Kernziele von Wölfel wurden methodisch, technisch und operativ erfüllt:

Wölfel konnte sowohl das partielle MKS-Modell der WEA als auch das Prüfstandsmodell erfolgreich aufbauen und zur Ableitung sowie zum Abgleich von Lasten einsetzen. Die parametrisierten FEM-Modelle für Ondulationen und Klebschichtvariationen wurden implementiert und ermöglichten eine systematische Bewertung von Fehlstellenausprägungen. Zudem wurden Ansätze zur Schädigungsinitiierung und -ausbreitung abgeleitet, Parameterstudien durchgeführt und umfangreiche Datensätze aus ReliaBlade und Add2ReliaBlade aufbereitet und in die Validierungsprozesse eingebunden. Ein erster Workflow für das Update numerischer Modelle wurde entwickelt.

Folgende Ziele konnten nicht erreicht werden:

Eine vollständige quantitative Validierung der Ermüdungsmodelle und des Schädigungsfortschritts war aufgrund der im Verbundprojekt auftretenden Unsicherheiten in den Belastungsrandbedingungen sowie fehlender bruchmechanischer Kennwerte nicht möglich. Ebenso konnte die erwartete Korrelation zwischen dynamischen Messgrößen (z. B. Dämpfung, Frequency Response) und dem tatsächlichen Schadensfortschritt am Gesamtsystem nicht nachgewiesen werden, sodass eine belastbare Übertragbarkeit auf Ganzblattebene ausblieb. Die Bewertung der Resttragfähigkeit konnte daher nur auf Komponentenebene abgebildet werden.

Technologischer Nutzen für Wölfel:

Wölfel hat im Projekt neue und erweiterte Werkzeugketten zur Modellierung, Analyse und Bewertung von Faserverbundschäden aufgebaut, die sich in zukünftigen Projekten direkt anwenden lassen. Die Entwicklung parametrischer FEM- und MKS-Modelle sowie die intensiven Erfahrungen im Umgang mit großen Versuchsdaten und deren Plausibilisierung stärken die Kompetenz im Bereich bruchmechanisch motivierter Schadensanalysen. Darüber hinaus kann der Modell-Update-Workflow eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung modellgestützter SHM-Ansätze darstellen, die langfristig die hauseigenen Überwachungssysteme ergänzen können.

Fazit

Wölfel konnte im Rahmen von Add2ReliaBlade ein durchgängiges Konzept von der modellbasierten Beschreibung initialer Fertigungsfehler über die Analyse des Schädigungsbeginns bis hin zur simulationsgestützten Bewertung der strukturellen Resttragfähigkeit umsetzen. Trotz einzelner nicht erreichter Ziele – insbesondere im Bereich dynamischer Schadensdetektion und vollständiger Ermüdungsvalidierung – stehen robuste Modelle, valide Komponentenbewertungen und ein belastbarer Daten- und Methodenrahmen zur Verfügung. Damit schafft das Projekt eine wichtige Grundlage für zukünftige Anwendungen in der Schadensprognose, der virtuellen Prüfung sowie der Weiterentwicklung von SHM-Systemen.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Weiteren soll auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises eingegangen werden:

- Die Personalkosten für die Mitarbeitenden im Projekt stellen den mit Abstand größten Kostenfaktor dar. Aufgrund der Corona-Pandemie sowie der darüber hinaus erforderlichen Umplanungen und Projektverlängerung fiel der Personalaufwand höher aus als ursprünglich vorgesehen.
- Die geplanten vorhabensspezifischen Abschreibungen für Software-Lizenzen wurden ebenfalls im Rahmen der notwendigen Projektverlängerung überschritten.
- Gleiches gilt für die Reisekosten, die ebenfalls geringfügig über dem eigentlichen Planwert liegen.

In Summe liegt bei Wölfel gegenüber der Planung ein Mehraufwand vor.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Bearbeitung der Arbeitspakete wurde von hochqualifizierten Mitarbeitern des Geschäftsfelds ME effektiv, ziel- und ergebnisorientiert durchgeführt. Die Vorhabenziele wären ohne Förderung nicht erreicht worden.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse erfolgt gezielt über zwei zentrale Schienen. Erstens erweitert Wölfel sein Dienstleistungsportfolio um spezialisierte Berechnungs- und Simulationsdienstleistungen zu Ermüdung, Schadensbewertung und Restlebensdauer von Faserverbundkunststoffen. Zweitens fließen die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu Schadensinitiierung und -progression in die Weiterentwicklung der SHM-Produktfamilie SHM.Blade® und IDD.Blade® ein, indem modellbasierte Schadensbeschreibungen in bestehende Überwachungssysteme integriert werden können. Kurz-, mittel- und langfristig stärken diese Entwicklungen Wölfels Position in Simulation und Strukturüberwachung und schaffen eine solide Grundlage für weitere Marktpotenziale und technologische Fortschritte.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind dem ZE keine wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens während der Durchführung des Vorhabens bekannt geworden.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse zum Schädigungsverhalten von Ondulationen wurden dem Fachpublikum auf der Wind Energy Science Conference (WESC) 2023 in Glasgow präsentiert:

Erdmann, P.; Flindt, R. et al.; Analyzing the progressive damage behaviour and failure mechanism of out of plane wrinkles using numerical methods, WESC 2023, 23 – 26 Mai 2023



Die Projektergebnisse werden in Form dieses Schlussberichts bei der TIB (Technische Informationsbibliothek (TIB) - Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover) veröffentlicht.